

国家自然科学基金项目 (40802076、40372123) 资助
江苏高校优势学科建设工程项目资助
中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目资助

厚松散含水层采动 水砂突涌规律与致灾机制

杨伟峰 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(40802076、40372123)资助

江苏高校优势学科建设工程项目资助

中国矿业大学“211 工程”三期创新人才培养项目资助

厚松散含水层采动水砂突涌规律 与致灾机制

杨伟峰 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以工程地质力学和地下水动力学理论为基础,以地学信息技术为平台,以薄基岩厚松散层条件下开采的工作面为地质原型,分析了研究区薄基岩特征,明确了薄基岩的涵义,建立了工程地质模型,揭示了不同岩性组合薄基岩的采动破断机理,归纳总结了薄基岩厚松散层下开采水砂流涌出通道形成的三类工程地质模式;设计并采用水砂混合流运移及突涌试验模型,模拟了采矿覆岩体裂隙通道中水砂混合流在运移与突出过程中的启动、运移和稳定的全过程,从采动诱发水砂流的工程地质模式、影响水砂运移的基本地质因素、动力因素入手,揭示了采动诱发水砂混合流运移特性及动力机制。本书的观点和结论为有效地预防水砂流突涌地质灾害提供了理论上的支持,对于解决我国众多矿井在厚松散含水层下安全、合理采煤,提高煤炭资源回采率具有重要的参考价值。

本书可供从事矿井地质、水文地质与工程地质、矿山安全和地下工程等方面的科研和工程技术人员及相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

厚松散含水层采动水砂突涌规律与致灾机制 / 杨伟峰

著. —徐州: 中国矿业大学出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1674 - 8

I. ①厚… II. ①杨… III. ①疏松地层—含水层—采
动—地质灾害—研究 IV. ①TD745

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 236978 号

书 名 厚松散含水层采动水砂突涌规律与致灾机制

著 者 杨伟峰

责任编辑 潘俊成

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 11 字数 228 千字

版次印次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

人类工程活动规模不断扩大,已成为改造自然环境的重要因素,甚至超过了各种自然营力的作用。煤炭资源的开采,在为国民经济建设提供动力和原料的同时,也引发了各种工程灾害与环境损伤,不仅耗费过量的土地资源,而且开采后毁坏的土地,既破坏原有的自然生态系统,又难以直接使其成为进一步服务于社会某种经济目的的用地。

煤炭资源的开发利用是我国经济发展的重要组成部分。随着我国工农业生产的迅速发展,对煤炭的需求量日益增长,能源的紧张状况依然存在,水体下采煤渐渐成为浅部能源开发的热点问题。在华东、华北和西北地区,浅部煤层开采受上覆松散含水层和地表水影响,采掘过程中煤矿顶板水砂灾害日渐多发,这给矿井的安全生产带来很大威胁,严重制约着煤炭工业的发展。

我国水体下压煤量巨大,仅苏鲁豫皖煤矿留设的松散层防水煤岩柱就有 50 亿 t 之多。矿井生产初期一般都避开水体下开采的问题,但是我国人口众多,煤炭需求量大,为了缓解能源紧张,解决我国众多矿井在厚松散含水层下安全、合理采煤,最大限度地提高煤炭资源回采率,就成为刻不容缓的任务。我国东部矿井在进入深部开采的同时,更要对矿井上部开采水平的“水下”等“三下”压煤进行开采。煤炭开采处于极为复杂的地质环境中,复杂的地质条件是造成灾害性事故的根本原因。溃砂或水砂流突涌是薄基岩厚松散含水层条件下采掘时含砂量较高的水砂混合流体溃入井下工作面并造成财产损失及人员伤亡的一种矿井地质灾害。溃砂或水砂流突涌产生的机理和影响因素与一般意义上的矿井水害不同,应作为一种独立的矿井地质灾害种类来对待。水砂流运移与突涌特性及动力机制的研究,一方面是安全生产的迫切需要,另一方面也是合理保护矿井地质环境的重要理论基础。

国内外众多学者对本学科的发展做出了不懈努力,在防水煤岩柱留设、覆岩

移动破坏、地表变形、采动岩体渗透及渗流、水土(岩)耦合以及水体下采煤实践等多方面,取得了大量的研究成果,极大地推动了本学科的发展和认知领域。

本书系统总结了厚松散层薄基岩下采掘水砂流运移及突涌机制与防治方面的理论成果及实践经验。在国家自然科学基金项目(40802076、40372123)、中国博士后科学基金项目(20110491476)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX07B_148z)和江苏省青蓝工程资助下完成的,同时也得到了江苏高校优势学科建设工程项目和中国矿业大学“211 工程”三期创新人才培养项目资助。

全书共分为七章。第一章为绪论,介绍了厚松散层薄基岩下采掘水砂流运移及突涌灾害研究的意义、国内外研究现状、本书的研究内容和技术路线等;第二章是厚松散层薄基岩地质特征,首先明确了薄基岩涵义,概述了薄基岩厚覆盖层下采煤属于特殊地质条件下的开采问题,介绍了两例典型厚松散层薄基岩矿区地质特征,为构建工程地质模型研究薄基岩采动破断规律的地质原型奠定了基础;第三章是薄基岩采动破断规律,介绍了两种物理模型试验和数值模拟,获得了薄基岩厚松散层矿区开采覆岩破坏的基本规律以及“三带”的发育特征;第四章是采动诱发水砂混合流运移特征模拟试验,归纳了薄基岩厚松散层下开采水砂流涌出通道形成的三类原因,介绍了一种能够模拟水砂流运移及突涌的模型的设计和制造过程,定量化地研究了水砂混合物运移及涌出的多种地质信息;第五章为水砂混合流动力机制,通过设置不同水砂混合物成分、不同水压力、不同通道类型的模型试验,研究了水砂流运移特征,提出了水砂流运移的三个阶段及三种水砂突出类型,通过试验与颗粒流数值模拟,探索了水砂混合流运移特征及动力机制;第六章是水砂流地质灾害防治,包括疏降水地质工程措施、薄基岩条带开采设计;第七章为主要结论和讨论。

本书出版之际,作者特别感谢中国矿业大学隋旺华教授,这是隋教授始终给予无微不至的关怀和悉心指导的结果,其中的不少内容是隋教授有关学术思想的细化和延伸。中国矿业大学狄乾生教授、郑世书教授、秦勇教授、姜振泉教授、郭英海教授、李文平教授、孙亚军教授、柏建彪教授、杨兰和教授、曹丽文教授、董青红教授、方新秋教授、李巨龙副教授、吴圣林副教授、夏筱红副教授、于宗仁高级实验师、张改玲高级实验师、王档良讲师等在项目选题和研究过程中也都给予

了热情的帮助和指导。南京大学李晓昭教授、中国矿业大学(北京)武强教授、安徽理工大学吴基文教授、山东科技大学张文泉教授等专家学者在相关课题评审中给予了大力支持和帮助。在资料收集和本书编写过程中也得到了兖州矿务局太平煤矿陈德俊总工程师、赵庆杰副总工程师、中国航空工业勘察技术研究院戴彦杰高级工程师、北京航天勘察设计研究院郭密文研究员、北京城乡建设集团紫荆市政工程公司谢校亭硕士、北京鼎实建筑工程有限公司李怀奇硕士、中国矿业大学(北京)郑磊硕士、中国矿业大学沈丁一硕士、吉育兵硕士和赵国荣硕士的鼎力支持。对以上单位和个人在此一并表示衷心的感谢! 作者在研究和写作过程中参考和引用了相关学者及技术人员的文献和资料,它们是本书写作的重要背景,书后的参考文献列出了所引用文献,并在引用处进行了标注,在此谨向原作者表示衷心的感谢,如有引述不当或疏忽之处,也请原作者见谅。

科学研究永无止境,安全开采与矿井地质环境协调发展有无数科学与技术问题需要去探索,期望本书能起到抛砖引玉的作用,敬希广大读者予以批评和指教。

作 者

2014 年 12 月于徐州

目 录

1 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状分析	3
1.3 本书主要内容	9
1.4 技术路线和研究方案	10
2 厚松散层薄基岩地质特征	13
2.1 薄基岩的概念	13
2.2 薄基岩厚松散层下采煤概况	14
2.3 典型厚松散层薄基岩矿区地质特征	16
2.4 小结	35
3 薄基岩采动破断规律	37
3.1 引言	37
3.2 工程地质力学模型	38
3.3 相似材料模型试验	47
3.4 有限元数值模型	54
3.5 离散元模型与覆岩运动规律分析	64
3.6 覆岩破坏高度计算方法	67
3.7 小结	68
4 采动诱发水砂混合流运移特征模拟试验	70
4.1 水砂混合流涌出通道的形成原因	70
4.2 采动诱发水砂混合流模拟实验	72
4.3 小结	93
5 水砂混合流动力机制	95
5.1 水砂混合流运移的通道类型与设计	95

5.2	水砂混合流运移通道中孔隙水压力变化规律·····	98
5.3	裂隙通道中的阻力损失·····	117
5.4	水砂混合流流固耦合模型·····	119
5.5	水砂流运移离散元数值模拟·····	123
5.6	小结·····	131
6	水砂流地质灾害防治·····	133
6.1	疏降水地质工程措施·····	134
6.2	薄基岩条带开采设计·····	142
7	总结与讨论·····	154
	参考文献·····	158

1 绪 论

1.1 研究意义

煤炭资源的开发利用是我国国民经济发展的重要组成部分。随着我国工农业生产的迅速发展,对煤炭的需求量日益增长,能源的紧张状况依然存在。煤炭工业的发展受多种因素制约,除当前国家政策性因素外,瓦斯、粉尘爆炸,矿井突水,矿井明火火灾,煤与瓦斯突出,冲击地压和大量冒顶等煤矿的地质灾害是其主要自然限制因素,其中地下水害对煤矿的生产和建设构成极大威胁,灾害发生时往往具有突发性、灾难性、破坏性、继发性的特点,一旦事故发生,就会使矿井系统遭受严重的破坏,它不但使生产中断、井巷工程和生产设备损毁,同时,安全通道堵塞、通风系统破坏、有毒气体扩散、严重缺氧,会造成更多人员的伤亡^[1]。例如,2002年7月24~28日,美国宾夕法尼亚州一煤矿发生特大突水事故,井下9人被堵在采掘工作面;我国内蒙古平庄小风水沟煤矿、吉林舒兰煤矿在泥质胶结砂层或疏松砂层下开采时,都发生了溃砂突泥,湖南宁乡鸽子山煤矿井下突泥,6人被困井下58h;隧道工程领域也不乏如渝怀线圆梁山隧道、通渝隧道等严重突泥灾害事例。尤其是近年来我国华东、华北、西北等地的许多煤矿,开采上限不断提高,已经在近松散层的不同风化程度岩层内采掘。2002年10月31日,山东邹城市横河煤矿某采煤工作面发生溃砂事故,把2名工作人员堵在运输顺槽里面;2003年4月16日,湖南娄底涟源市七一煤矿发生突水事故,水、砂、泥石封堵了安全出口,17名矿工被困井下。

随着煤炭资源的日趋紧张,水体下采煤渐渐成为浅部能源开发的热点问题。尤其是中国东部地区,浅部煤层上覆松散含水层和地表水,采掘过程中煤矿顶板水砂灾害日渐多发,这给矿井的安全生产带来很大威胁,严重制约着煤炭工业的发展。要保证煤炭资源开发的稳步发展,摆脱突水溃砂灾害的严重困扰,在水体下(包括地表水体和含水层)采煤时,防止水砂突涌,科学合理地设计开采上限,进行岩层控制和研究水砂混合流运移特性及其动力机制,是控制薄基岩厚松散层下安全采煤的关键问题之一,对保护矿工生命安全和国家财产具有重大的意义。

水砂流运移突涌规律与致灾机制研究的意义具体体现如下:

(1) 解决我国众多矿井水体下采煤的合理性和安全性问题,摆脱突水溃砂灾害的困扰,缓解能源紧张。

我国水体下压煤量巨大,仅苏鲁豫皖煤矿留设的松散层防水煤岩柱就有 50 亿 t 之多。矿井生产初期一般都避开水体下开采的问题,但是我国人口众多、煤炭需求量大,为了缓解能源紧张,解决我国众多矿井在厚松散含水层下安全、合理采煤,最大限度地提高煤炭资源回采率,就成为刻不容缓的任务。我国东部矿井在进入深部开采的同时,更要对矿井上部开采水平的“水下”等“三下”压煤进行开采,这对提高煤矿的生产效率,促进煤炭生产高产高效,回收矿井建设成本,具有重要的意义。

(2) 最大限度地减少水砂混合流突涌灾害预防的盲目性,提高煤炭企业挖潜改造效益和安全生产。

靠近松散层的煤层上覆基岩厚度大部分为 0~60 m,时刻面临着突水涌砂的威胁。突水、涌砂事故轻者冲垮工作面、淹没设备、增加矿井排水负担,严重者造成人员伤亡、淹井,全国已经发生数十起近松散层开采上部含水层造成的突水涌砂和淹井事故,造成重大经济损失,严重威胁矿工生命安全。例如 2002 年 10 月山东兖州横河煤矿提高开采上限发生的突砂事故、皖北祁东煤矿 2001 年 11 月 24 日的淹井事故都造成了重大损失和严重的社会影响。由于对水砂混合物突涌灾害发生前后地质信息的分析不到位,不能及时准确地确定灾害的类型、规模等主要的工程地质特征,当然也就不能提供快速有效地治理措施。因此,研究水砂混合流运移特征及其动力机制,可以最大限度地减少水砂混合物突涌灾害防治的盲目性,在保证生产施工安全的前提下降低生产成本,增加经济效益,对防止和减少生命与财产损失具有重要的意义。

(3) 有效地保护矿区环境和地下水资源,达到可持续发展的目的。

我国水资源分布不平衡,对于华东、华北、西北等煤炭基地,地下水资源尤其宝贵。靠近松散含水层开采会造成大量地下水流入矿井,而这部分水又经过污染作为矿井废水排出、流失,每年流失量将以亿 m^3 计^[2]。水砂混合流突涌灾害发生时,不仅对矿山施工建设造成巨大的经济损失,同时也会对灾害发生的矿区环境和地下水资源造成很大的破坏和浪费,而且还会引起地面沉降,周围居民饮用地下水减少、污染甚至枯竭的后果。因此本课题重点研究发生突涌灾害的水砂混合流运移规律及赋存特点,保护矿区的环境和地下水资源,使地下采煤与周围地质环境和谐共存,达到可持续发展的目标,在做好“保水采煤”的同时,提出相应开采及工程措施。

(4) 帮助修订采煤规程规范。

传统规范、规程难以适用薄基岩厚松散含水层下采煤水砂流突涌的防治。薄基岩厚松散含水层下采煤时,由于覆岩结构、力学性质、含水条件等与正常条件下的开采相比有很大不同,采用传统的规范、规程预测突水涌砂的方法已经难以适用,全国在近松散含水层下已经进行的大量开采实践还没有经过系统的研究、归纳和总结,这就要求我们以新方法、新思路对此类地质采矿条件突水、突砂的动力机制进行系统研究。掌握水砂混合流在岩体中运移的主要特点,加快对于突涌灾害发生时各种地质信息的预测,从中归纳出水砂混合流在岩体中运移、突涌的主要控制因素,及时采取针对性强的治理措施,帮助修订传统采煤规范,使之更实用、更简便。

(5) 薄基岩厚松散层下采煤水砂混合流运移特性及其动力机制研究具有重要的学术价值和广阔的应用前景。

水砂流运移突涌规律与致灾机制研究将拓宽工程地质学科的研究领域,促进地质、工程地质、水文地质、采矿工程、泥沙工程及开采沉陷学科的交叉渗透,促进形成新的学科生长点;除了对水砂混合流运移特性进行广泛的研究外,还要对水砂混合物的性质、水砂混合流突涌通道及影响水砂突涌的动力机制进行详细的研究,探讨其中主要控制因素对于水砂混合流运移过程中流固耦合关系的影响,总结水砂混合流在岩体中突涌的基本规律,建立水砂混合流在岩体中突涌的工程地质模型,并在理论研究方面取得相应的进展,最终为解放大量呆滞煤炭资源提供科学理论和技术依据。

1.2 国内外研究现状分析

厚松散层薄基岩下水砂流运移突涌规律与致灾机制研究涉及采矿工程、煤矿工程地质、岩土力学、地质灾害防治及矿井水文地质等学科领域。

水砂混合流运移、突涌现象,是一种受地下采矿工程活动影响的动力现象,国内外学者对厚松散层薄基岩下开采及水砂突涌进行了许多有益的探索。根据前期科研工作及查阅的有关文献资料,现就相关的研究简述如下。

1.2.1 薄基岩厚松散含水层条件下煤炭资源开采及防治水研究

国内外对薄基岩煤层开采后顶板大面积破断引发的矿压显现规律与防治对策研究较多,黄庆亨^[3,4]研究了浅埋煤层的矿压特征,侯忠杰^[5]分析了厚土层薄基岩浅埋煤层“支架—围岩”关系,许家林^[6]研究了邻近松散承压含水层开采工作面压架机理与防治等,能够科学地预测采煤工作面基本顶初次来压、周期来压,为确定工作面支架形式和支护参数及回采工艺提供了理论依据。

涂敏^[7]、杨伟峰^[8,9]、胡炳南^[10]、郭惟嘉^[11]等针对薄基岩厚松散层煤层开采的防水煤岩柱留设、覆岩移动破坏、地表变形参数等进行了研究。

松散含水层及煤层顶板在采动条件下的变形、渗透和破坏过程、开采上限问题是预警预测系统研究的必要条件之一。我国水体下采煤和近年逐步增多的近松散含水层下开采实践为水砂流运移突涌规律与致灾机制研究提供了丰富的基础资料。

50 多年来,我国在水体下采煤方面进行了大量的研究和实践,积累了丰富的经验,编制和修订了《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》^[12],在覆岩破坏研究等相关领域取得了一批重要的理论和实践成果^[13-16],各类地表水体下的开采技术提供了许多有益的启示^[17-22]。松散含水层下采煤是水体下采煤的重要方面,近年来华东、华北、西北等地的许多煤矿,开采上限不断提高,已经在不同矿区、不同富水程度的松散含水层下开展近松散层开采^[23-35]。开采上限提高的程度和所遇到的水文地质、工程地质条件的复杂性,都是国际采矿界所罕见的。这些不同地质、采矿条件下薄基岩厚松散层开采中的开采上限、覆岩破坏、水害及防治的生产实践及科学研究都积累了大量的资料。

现代非线性理论、地球探测信息技术、实验技术等在水下采煤中的应用为水砂流运移突涌规律研究提供了必要的技术参考。自 1980 年以后,针对松散含水层下采煤开展了大量的专题研究,各种新理论和新技术被广泛应用于导水裂隙带探测中。理论方面有系统理论方法、神经网络、模糊数学等^[36,37];探测技术方面有微震监测、钻孔电视、地质雷达、井下测井、相似材料模拟、离心模拟、数值模拟、电法和地震勘探等^[38-42]。煤矿底板突水研究中的优势面理论和智能监测技术成果也为本书研究提供了参考^[43-46]。

在具体的方法和研究手段方面,中国矿业大学的采矿工程、地质工程及相关专业的学者相继提出了各自的观点和认识,关键层、基于 GIS 的多元信息拟和等理论和方法也被应用到薄基岩厚松散层下采动过程研究中。其中,狄乾生等^[16]提出的开采岩层移动工程地质研究理论及方法是结合煤矿工程地质实际开展的新的工程地质研究方向,在该理论指导下已经完成科研项目多项,在金乡、横河、太平、杨庄等矿井创造了巨大的经济效益。隋旺华^[47]先后提出煤矿工程地质模型和工程地质决策模型等观点,展开了疏放条件下防砂煤柱的研究工作。

这些理论在我国煤矿开采岩层控制中得到了广泛应用的同时,在防治水、水砂突涌等应用方面也得到所发展^[48-52]。这些不同地质、采矿条件下的覆岩破坏、开采上限、水害及其防治的生产实践及科研过程中积累的大量资料,是水砂流运移突涌规律与致灾机制研究的重要基础。

1.2.2 岩体的渗透及渗流理论研究

针对非采动岩石(体),国内外学者进行了单一裂隙渗流应力耦合机理的研究,提出了各种不同的渗流应力耦合模型并进行相应的数值理论分析。通过测试渗透参数评价各种渗流模型的适用条件,通过室内实验分析岩石应力应变—渗透率全过程,建立应力峰值前后渗透率的演化方程。

E. S. Romm^[53]根据 Navier-Stokes 方程推导出了单一裂隙理想模型中层流的表达式;T. Levy^[54]从理论上讨论了单一方向裂隙中的渗流;M. Bai^[55]利用拓扑原理建立了裂隙网络模型;王洪涛^[56]研究了主干裂纹与网络状裂纹并存的情况;J. L. Lage^[57]提出单裂隙空间平板模型;陈胜宏^[58]、赵阳升^[59]则对块体结构中渗流做了较多探讨;J. Jaffre^[60]专门研究了不连续面中的两相流。等效连续介质模型是经 D. T. Snow^[61,62]创立的渗透张量理论为基础,用连续介质方法描述岩体的渗流问题;双重介质模型是由苏联学者巴伦布拉特^[63]提出的,假定岩体是孔隙介质和裂隙介质相重叠的连续介质(即“孔隙—裂隙二重性”);孔隙介质贮水,裂隙介质导水。此外,T. E. Warran^[64]、T. D. Streltsova^[65]、P. S. Huyakorn^[66]等提出了各自的双重介质理论模型,不同之处在于对裂隙系统和孔隙系统以及两系统之间的水交替进行了不同的概化。广义双重介质渗流模型是由国内王恩志^[67]率先提出来的,是对双重介质渗流理论的发展,该模型从实用角度出发,将裂隙岩体中的裂隙按对水渗流所起的作用划分为主干裂隙和次要裂隙。

缪协兴等^[68]对采动岩体的峰后破裂岩体渗流和破碎岩体渗流进行了详细研究,峰后破裂岩体渗流以破裂岩体为基本介质,主要研究了裂隙渗流规律、夹缝渗流规律及流场随机分布演化等,根据渗流特性和研究方法开展了动力学系统的非线性行为研究。

白矛^[69,70]经过试分析提出的有限元模型可以有效地预计地表沉陷以及地下水的流动,并根据 Biot 固结原理^[71,72]提出非稳定流孔隙弹性有限元模型,用以研究长壁开采对岩层变形及岩层水文地质环境的影响。

岩体裂隙渗流理论研究为研究裂隙通道中水砂流运移特征提供了参考。

1.2.3 水土(岩)耦合理论的研究与发展

水砂流运移、突涌是一个非常复杂的耦合问题,包括渗流场、应力场、应变场、温度场等多种物理化学场的复杂耦合。目前正迅速发展的耦合理论和技术对解决此类问题具有明显的优势。水土(岩)耦合理论最早被发展解决土的固结问题,K. Terzaghi^[73]研究了流体—固体变形的耦合现象,他首先提出了有效应

力概念,并建立了一维固结模型。M. A. Biot^[71,72]则建立了比较完善的三维固结理论。

自 M. A. Biot(1941,1956)发表了他的固结理论起,半个多世纪以来,被不断引入复杂的材料模式和本构关系,在解决实际问题中起到了重要的作用。A. Lubinski^[74]、徐曾和^[75]、张金才^[76]等又对 Biot 理论进行了发展。双重孔隙介质(Dual-Porosity)概念最早由 G. I. Barenblatt 等^[63]提出,用于研究裂隙—孔隙介质的渗流。经过一定的简化以后,该理论被用于石油工业中^[64]。耦合双重介质孔隙弹性理论由 E. C. Aifantis^[77]提出,将固体变形对裂隙孔隙介质中渗流的影响结合在一起考虑。之后,双重孔隙弹性理论被广泛地扩展到多相流、热孔隙弹塑性、非线性流动以及各项工程中。双重孔隙弹性理论在英国、美国、加拿大、澳大利亚和其他许多国家得到广泛的承认,特别在石油、地下水、环境工程等领域被广泛应用。该理论由刘天泉和白矛引入中国^[69,70],并在三亚组织了相关的国际会议,展示了国内外岩石力学、采矿工程、石油工程、土木工程、环境工程领域在水土(岩)耦合作用理论研究和应用方面的进展^[78]。

段小宁^[79]、杨天鸿^[80]、C. J. Leo^[81]等对应力场与渗流场相互作用下裂隙岩体传输问题做了数值模拟;高海鹰^[82]研究了三维裂隙岩体渗流场与应力场的耦合;王媛^[83]用四自由度耦合法处理了裂隙岩体渗流与应力耦合问题;陈平等^[84]也做了裂隙岩体渗流与应力耦合的分析。

水土(岩)耦合理论对水砂流运移突涌规律研究提供了丰富的理论指导,为建立裂隙通道水砂混合流渗流场与应力场耦合、流固耦合关系奠定了基础。

1.2.4 水砂混合流运移通道及水动力学研究

薄基岩厚松散层下开采采空区充水的水源实际上包含了自然条件下和人工条件下的双重水源,而充水通道也是由自然充水通道如断裂、露头 and 人为通道如顶板冒裂等综合构成。中科院地质所提出“强渗通道”理论^[85],认为是否发生突水关键在于是否具备突水通道。一种情况,岩体水文地质结构存在与水源沟通的固有突水通道,当其被工程活动揭穿时,即可产生突破性的大量水突涌,构成事故;另一种情况,岩体中不存在这种固有的突水通道,但在工程应力、地应力以及地下水共同作用下,沿袭岩体结构和水文地质结构中原有的薄弱环节发生形变、蜕变与破坏,形成新的贯穿性强渗通道而诱发突水。前者属于原生通道突涌,后者属于再生或次生通道突涌。

梁燕^[86]、汤爱平^[87]、张敏江^[88]等利用物理模拟进行了突水涌砂过程模拟,将所研究的地下水系统作为封闭独立系统来考虑,认为危害性的突水涌砂发生时,含水层常具有较高的超静水压力和动水压力,且其值越大,突水砂量越大,天

然条件下形成的渗流,其动水压力不足以改变含水层的弱胶结状态而形成涌砂,只有存在人为临空面,如钻孔揭露,巷道穿过含水层,才能在临空面附近形成较大的动水压力,造成突水涌砂。

隋旺华^[89]使用长江科学院的大型离心机对开采沉陷过程中土体含隔水层变形特征和不同部位的孔隙水压力变化进行了观测,证实采空区上方土层中的孔隙水压力在煤层开采以后,先出现一个短暂的下降过程,随着变形发展产生超静孔隙水压力,煤柱上方土层呈现出明显的正超静孔隙水压力;各部位超静孔隙水压力达到峰值后,随时间逐渐消散。实践也证明,大多数突水涌砂灾害的发生均与岩层中地下水有较高的超静水压力有关^[89-94]。

国外水下采煤的经验极为丰富,但对于采动水砂突涌问题的研究相对较少,相关的研究主要在于:水流挟砂能力问题^[90];砂在水平油井中的运移在很大程度上受砂的颗粒大小、形状、排列及砂拱的限制^[91];通过离心模型实验研究液化变形的孔隙重分布效应,来解释水砂突涌过程中的松散层渗透性^[92];水砂流的输送、运移问题,揭示了水砂的运动力学行为^[93,94];深部砂土在特定应力、水头、突涌条件下的状态问题^[95-97]。

另外,河流泥沙工程、泥沙输送理论与实践、泥沙运动力学等^[98-103]研究,对于矿井水砂流的起动、运移、突涌问题,也是一个值得借鉴的领域。

1.2.5 研究与实践中仍存在的问题

(1) 煤层采动薄基岩破断机理有待深入研究

薄基岩厚覆盖层下采煤属于特殊地质条件下的开采问题,由于厚覆盖层都是由第四系、新近系和古近系松散层组成,其中往往含有一定厚度砂层、砾石层或砂砾互层,当其厚度较大并且富水性较好时,常构成含水丰富的含水层。如果这些含水层位于覆盖层底部时,并且受煤层采动破坏后的导水裂隙带所波及及时,就会发生突然涌水涌砂事故。在薄基岩条件下,导水裂隙带容易贯通基岩,直接波及覆盖层底部的含水层,导致工作面突水、涌砂;另外,当基岩厚度很小时,上面覆盖的松散层随薄基岩垮落而增加(甚至大大增加)支架的附加载荷,发生压架事故。

薄基岩煤层开采后,顶板大面积破断引发的覆岩破断规律与防治对策,国内外研究较少。薄基岩煤层开采后,覆岩如何破断、破断后的岩层能否形成结构、该结构的稳定状况及主要影响因素是什么?薄基岩煤层开采的矿压特征、支架形式及支护参数如何确定?薄基岩煤层开采后的导水裂隙带如何计算?可供参考的工程实践也较少。

采煤过程中,薄基岩岩层不能形成砌体梁一类稳定的“大结构”情况下,在岩

层破断、由下往上传递的动态过程中,对形成的采场矿压显现规律进行研究,弄清上覆岩层的变形破断及其运动规律以及在运动过程中与软岩层间的相互耦合作用关系,对于实现薄基岩厚松散层下的煤层安全开采具有重要的意义。

(2) 薄基岩厚松散含水层开采水砂流运移特性及动力机制亟待进一步系统化

一方面,人们对覆岩破坏规律的认识还局限于在覆岩厚度较大情况下获得的经验,以往对覆岩破坏规律性的认识大都是在覆岩厚度比较大(一般大于导水裂隙带发育高度)、结构相对完整的情况下获得的,显然,它不适应薄基岩厚松散层覆岩(包括风化岩体)的结构与性质;传统的研究也没有把覆岩变形破坏与此种条件下的渗透变形、突水涌砂综合考虑并作为耦合问题研究;另一方面,采矿实践也已证明,由于缺乏对此类地质条件下水砂混合流运移问题的研究,传统规范和方法已经不能恰当地指导此类地质条件下开采上限的确定,实际中不少矿井开采上限已经大大突破了规程的限制实现了安全生产,例如兖州的杨庄煤矿、枣庄的柴里煤矿、淮北的芦岭煤矿、百善煤矿等。也有矿井虽然留设符合规定的防水煤(岩)柱,但仍然发生突水甚至淹井事故,例如皖北祁东煤矿 2001 年 11 月 24 日的淹井事故,在留设防水煤岩柱高度大于规程要求情况下,发生 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{h}$ 涌水而淹井。因此,从水砂混合流运移的机理看,厚松散层下薄基岩、缓倾斜煤层采动破坏的水砂、岩相互作用的物理、力学行为,在特定条件下,顶板覆岩阻水特性与松散层水体水头关系问题是判别水砂起动、运移机制、进行突水涌砂预报的关键。

对于突水涌砂过程的研究,生产单位和研究机构都考虑了突涌过程中的流量、水量和砂体体积问题。对于水砂流通过垮落岩体、狭小断面构成的通道监测和研究,以及对于水砂流启动、运移、稳定的条件,水砂流运动对通道的破坏过程的分析,基本都是实际生产难以实现的环节,以往对突水涌砂过程、防治的研究往往以定性研究居多,就水砂混合流运移模式、动力机制的量化评价有待进一步系统化。

地下岩体的渗透变形、水动力变化特征直接与岩体本身的工程地质特征密切相关,同时受到开采施工的影响,而水砂混合物突涌灾害往往发生在矿床开采过程中。因此,研究开挖过程中发生水砂混合物突涌灾害的地下岩体的渗透变形水动力变化特征,随时掌握地下岩体物质组成、渗透特性、原始应力状态以及渗透变形特点,了解地下岩体水砂运移通道、水砂混合物及采矿扰动三方面的内在联系,是研究水砂流运移动力机制的重要内容。

另外,水砂流运移是地下渗流场、应力场相互作用的结果。地下渗流场贯穿于整个水砂运移、突出过程,应力场、动水压力、水砂源则为水砂运移、突出

提供了动力来源、通道和场所;渗流场与应力场耦合分析有助于分析水砂混合流突出及渗流机制。因此,有必要综合矿压、动水压力来分析水砂流运移及突涌机制。

1.3 本书主要内容

厚松散含水层采动水砂流运移突涌规律与致灾机制研究的总体方案是:以工程地质力学和地下水动力学理论为基础,以地学信息技术为平台,综合采用工程地质学、水文地质学、水动力学、岩土力学、开采沉陷学和采矿工程学的研究方法和试验测试手段,从厚松散含水层、薄基岩条件下开采突水涌砂的工程地质模式、影响突水涌砂的基本地质因素、采矿因素入手,以现场监测、工程地质力学和水动力学实验等技术为主要手段,建立地质模型,分析煤层采动薄基岩破断机理;建立水砂混合流运移的工程地质模型,研究采动影响下上覆岩土体渗透变形及孔隙水压力、水砂运移通道和围岩压力及动水压力等控制水砂混合流运移、突涌的动力机制,进行渗流场与应力场耦合分析,以探求水砂混合流突涌发生时地下岩体与水砂混合物间的水岩耦合关系。借助现代信息处理技术,综合分析现场及试验中得到的各种关于水砂混合流运移及其动力机制的地质信息,建立水砂混合流启动、运移和突出的预测系统模型,为快速有效地预报和防止水砂混合流突涌灾害提供理论上的支持。具体研究内容有:

(1) 煤系地质结构及薄基岩采动破断机理

研究煤系的物质组成、岩体结构、强度、变形性质以及岩体渗透特性与物质组成和岩体结构的关系,获得不同工程地质类型的覆岩及风化带岩体天然状态下水文地质工程地质特征,建立地质模型分析煤层采动薄基岩破断模式(机理),从影响突水涌砂的地质构造、地应力特征、地下水条件、开采条件、覆岩特征等方面着手,进行开采方法和岩层控制等方面的研究。

(2) 煤层开采水砂混合流运移特性

研制水砂混合流运移及突涌模型,使该模型能够模拟出地下采矿覆岩体通道中水砂混合流在运移与突出过程中的启动、运移和稳定的过程,方便用于研究水砂混合流运移中周围岩体与水砂混合流的水岩耦合关系。通过设置不同水砂混合物成分、不同水压力、不同通道的模型试验,量化地研究水砂混合物运移及涌出的多种地质信息,获得不同模型试验水砂混合流运移通道中不同位置监测的水压力变化曲线,同时分析裂隙通道水砂流速度与通道宽度的关系,观测水砂流通道溢出口出砂量与时间的变化关系。